№ 4054

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
**Технологический институт
Федерального государственного образовательного
учреждения высшего профессионального
образования
«Южный федеральный университет»**

**ПРИОРИТЕТНЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ
«ОБРАЗОВАНИЕ»
(2006-2007 гг.)**

**КАФЕДРА ЭЛЕКТРОГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ
И МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКИ**

Методическое пособие

по курсу
ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Часть 1
ТЕПЛОФИЗИКА

для специальности

180301 – Морская акустика и гидрофизика

Таганрог 2007

УДК 536.7 (07.07)

Составители: Куценко А.Н., Раскита М.А.

Методическое пособие по курсу «Техническая физика». Часть 1 «Теплофизика». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – 39 с.

Методическое пособие содержит разделы «Теплофизические свойства веществ», «Термодинамические процессы», «Термодинамические циклы», «Теплопередача», а также список рекомендуемой литературы по курсу. Каждый раздел методического пособия содержит краткие теоретические сведения, основные формулы для решения типовых задач и подборку задач как типовых, так и повышенной сложности.

Ил. 7. Библиогр.: 6 назв.

Рецензент О.А. Савицкий, канд.физ-мат. наук, доцент кафедры ВМ ТТИ ЮФУ.

Куценко Александр Николаевич
Раскита Максим Анатольевич

Методическое пособие
по курсу
Техническая физика
Часть 1
Теплофизика

Ответственный за выпуск Куценко А.Н.
Редактор Чиканенко Л.В.
Корректор Селезнева Н.И.

ЛР №020565 от 23.06.1997 г. Подписано к печати __.__. 2006 г.
Формат 60x84 1/16.
Печать офсетная. Бумага офсетная.
Усл. п. л. – 2,4 Уч.-изд.л. – 2,3.
Тираж 100 экз. Заказ №

Издательство Технологического института
Южного федерального университета
ГСП 17А, Таганрог, пер. Некрасовский, 44
Типография Технологического института
Южного федерального университета.
ГСП 17А, Таганрог, Энгельса, 1

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее методическое пособие представляет собой первую часть курса «Техническая физика», читаемого студентам специальности 180301 «Морская акустика и гидрофизика». Оно посвящено теоретическому и практическому освоению раздела «Теплофизика».

Здесь рассмотрены такие разделы как «Теплофизические свойства веществ», «Термодинамические процессы», «Термодинамические циклы», «Теплопередача» и «Равновесие фаз и фазовые переходы». В данном методическом пособии представлены краткие теоретические сведения, имеющие целью обеспечить самостоятельную работу студента над задачами, приведёнными в конце каждого раздела. Задачи подобраны таким образом, чтобы, изучив теоретические сведения, вникнуть в физику процессов, знать основные законы, соотношения и формулы рассматриваемых разделов. Решение некоторых задач потребует более глубокого самостоятельного изучения материала и использования дополнительной литературы, список которой приведён в конце пособия.

Во всех разделах пособия рассматриваются методы описания физических систем, состоящих из большого числа частиц. Как правило, это макросистемы, состоящие из микрочастиц. Макросистемой называется система, имеющая массу, сравнимую с массой окружающих нас предметов и тел. Микрочастица – это частица, масса которой сравнима с массой атомов. Например, в 1 литре воды содержится $3{,}3 \cdot 10^{25}$, а в 1 кубометре атмосферного воздуха – $2{,}5 \cdot 10^{25}$ молекул. Количества частиц в других окружающих нас макросистемах определяются числами того же порядка, поэтому необходимо ознакомиться с методами для их описания.

Материал методического пособия даёт навыки постановки, решения и анализа результатов тех или иных задач, относящихся к рассматриваемым в пособии разделам.

1. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ

1.1. Линейное расширение

Расширение твердого тела вдоль одного его измерения называется *линейным.* Если длина тела значительно больше, чем другие его размеры (ширина и высота), то главным образом увеличится длина, и его расширение можно рассматривать как линейное.

Различные твердые тела при нагревании их на одно и то же число градусов расширяются неодинаково. Наблюдаемое явление объясняется тем, что молекулы разных веществ имеют разные массы. Изменение температуры на одно и то же число градусов характеризует одинаковую среднюю квадратичную скорость молекул. Кинетическая энергия молекул с меньшей массой будет меньше, чем молекулы с большей массой. По этой причине межмолекулярные пространства различных веществ изменяются различно при одинаковой температуре, что и приводит к неодинаковому расширению. Для характеристики степени теплового расширения различных твердых тел пользуются понятием *коэффициента линейного расширения.*

Величина, показывающая, на какую долю начальной длины, взятой при 0°C, увеличивается длина тела при нагревании его на 1°C, называется коэффициентом линейного расширения.

Обозначим начальную длину тела при 0°C через l_o, длину тела, нагретого на t°C, через l_t и коэффициент линейного расширения через α, и рассмотрим следующий пример. При изменении температуры на t°C длина тела увеличивается на $\Delta l = l_t - l_0$. Предполагая, что увеличение длины при нагревании на каждый градус идет равномерно, найдем увеличение всей длины тела при нагревании на t°C:

$$\frac{\Delta l}{t} = \frac{l_t - l_0}{t}. \qquad (1)$$

Каждая единица длины увеличивается на

$$\frac{\Delta l}{l_0 t} = \frac{l_t - l_0}{l_0 t}. \qquad (2)$$

Полученное выражение соответствует определению

Задача 61*. При температуре $T = 717$ºК реакция образования йодистого водорода $H_2 + I_2 \rightleftarrows 2HI$ достигла равновесия. Зная начальное число молей йода $m_{I_2} = 2,94$ моля и начальное число молей водорода $m_{H_2} = 8,1$ моля, определить число молей HI при равновесии. Константа равновесия реакции при $T = 717$ºК известна: $K_p = K_c = 0,01984$.

Задача 62*. Вывести условие равновесия двух фаз из условия минимума термодинамического потенциала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Элементарный учебник физики / Под ред. акад. Г.С. Ландсберга. Том 1. – М.: Наука, 1964. – 544 с.
2. Н.Д. Бытько. Физика. Ч. 1 и 2. 3-е изд. – М.: Высш. школа, 1967. – 287 с.
3. Р. Кубо. Термодинамика / Пер. с англ. А.Г. Башкирова и Е.Е. Тареевой; Под ред. Д.Н. Зубарева и Н.М. Плакиды. – М.: Мир, 1970. – 304 с.
4. И.П. Базаров. Термодинамика. – М.: Гос. изд-во физико-математической литературы, 1961. – 292 с.
5. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача: Учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. школа, 1980. – 469 с.
6. К.В. Глаголев, А.Н. Морозов. Физическая термодинамика: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 272 с.

при буксировании автомобиля?

Задача 55. Кусок чугуна массой 2 кг, нагретый до 800°C, погрузили в 2 кг воды, находящейся в алюминиевом сосуде массой 800 г, при этом вся вода нагрелась от 20° до 100°C и часть ее испарилась. Определить количество испарившейся воды.

Задача 56. Сколько каменного угля потребуется для обращения в пар 1 т воды, взятой при 10°C, если температура кипения воды 170°C (при 8 атм), с кпд котла 70%?

Задача 57. Найти силу притяжения двух квадратных пластинок, между которыми находится слой жидкости толщиной d. Размер пластинок L много больше толщины слоя d, а поверхностное натяжение жидкости равно σ. Считать, что жидкость полностью смачивает пластинки.

Задача 58. Найти радиус R пузырька газа, находящегося в воде при температуре T с поверхностным натяжением σ, если гидростатическое давление воды равно P_0, а концентрация молекул газа n. Пузырек считать сферическим, а газ – идеальным.

Задача 59*. Найти давление, с которым конькобежец должен давить коньком на лед, чтобы расплавить его в отсутствии трения при температуре -3°C. При какой температуре T лед расплавиться, если давление конькобежца равно 0,4 МПа? Разность удельных объемов льда и воды $\mathrm{v}_1 - \mathrm{v}_2 = 9{,}1 \cdot 10^{-5}$ м^3/кг, удельная теплота плавления льда $q_{12} = 3{,}35 \cdot 10^5$ Дж/кг.

Задача 60*. Определить давление, при котором вода будет кипеть при температуре 90°C. На какой высоте можно ожидать кипение воды при этой температуре? Считать, что удельный объем пара много больше удельного объема воды $\mathrm{v}_2 \gg \mathrm{v}_1$, а удельная теплота испарения воды $q_{12} = 2{,}3 \cdot 10^6$ Дж/кг.

коэффициента линейного расширения, который можно записать как

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 t} \text{ или } \alpha = \frac{l_t - l_0}{l_0 t}, \text{ [град}^{-1}\text{]}. \quad (3)$$

При не очень больших температурах (не больше 200-300°C) изменение длины происходит почти пропорционально температуре *t*, и коэффициент α остается *постоянной* для данного вещества величиной. Для вычисления длины тела преобразуем формулу (3) в следующий вид:

$$l_t = l_0(1 + \alpha t). \quad (4)$$

Двучлен, стоящий в скобках, называется *биномом линейного расширения.* Он показывает, во сколько раз увеличилась длина тела при нагревании его от 0 до *t*°C.

Формула (4) является приближенной. Ею можно пользоваться только при указанной выше температуре. При больших изменениях температуры эту формулу применять нельзя.

При решении задач пользуются другой приближенной формулой, которая упрощает вычисления, связанные с линейным расширением тел. Например, если требуется рассчитать длину тела при нагревании от температуры t_1 до температуры t_2, то, пользуясь формулой конечной длины для температуры t_1, получим $l_1 = l_0(1 + \alpha t_1)$, для t_2 – $l_2 = l_0(1 + \alpha t_2)$. Разделим второе выражение на первое:

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{l_0(1 + \alpha t_2)}{l_0(1 + \alpha t_1)} \text{ или } \frac{l_2}{l_1} = \frac{1 + \alpha t_2}{1 + \alpha t_1}. \quad (5)$$

При делении правой части последнего равенства по правилам деления многочлена на многочлен, получим

$$1 + \alpha t_2 - \alpha t_1 + \frac{\alpha^2 t_2 t_1 + \alpha^2 t_1^2}{1 + \alpha t_1}. \quad (6)$$

Дробным слагаемым $\frac{\alpha^2 t_2 t_1 + \alpha^2 t_1^2}{1 + \alpha t_1}$ можно пренебречь, так как коэффициенты линейных расширений тел очень малы, а квадрат этих величин еще меньше.

Тогда получим приближенную формулу для расчёта линейного расширения тела

$$l_2 = l_1\left[1+\alpha\left(t_2 - t_1\right)\right]. \quad (7)$$

1.2. Объёмное расширение

Увеличение объема тел при нагревании называется *объемным расширением.* Объемное расширение характеризуется коэффициентом объемного расширения. *Величина, показывающая на какую долю начального объема, взятого при 0°С, увеличивается объем тела от нагревания на 1°С, называется коэффициентом объемного расширения.*

Обозначив начальный объем, взятый при 0°С, через V_0, конечный объем при температуре t°С через V_t, коэффициент объемного расширения через β, рассмотрим следующий пример. При нагревании от 0 до t°С объем тела увеличится на $\Delta V = V_t - V_0$; увеличение всего объема при нагревании на 1°С будет равно (при предположении, что увеличение объема при нагревании на каждый градус идет равномерно)

$$\frac{\Delta V}{t} = \frac{V_t - V_0}{t}. \quad (8)$$

Увеличение каждой единицы объема тела относительно начального выразится формулой

$$\frac{\Delta V}{V_0 t} = \frac{V_t - V_0}{V_0 t}. \quad (9)$$

Согласно определению коэффициента объемного расширения можно записать:

$$\beta = \frac{\Delta V}{V_0 t} \text{ или } \beta = \frac{V_t - V_0}{V_0 t}, \text{ [град}^{-1}\text{]}. \quad (10)$$

Из последней формулы получим, как и в случае линейного расширения,

$$V_t = V_0(1+\beta t). \quad (11)$$

Двучлен $(1+\beta t)$ называется *биномом объемного расширения*, который показывает, во сколько раз увеличился объем тела при нагревании его от 0 до t°С.

Если объем тела при температуре t_1 будет равен V_1, тогда

(от температуры конденсации до окончательной температуры), $Q' = cm(t_п - \theta)$; количество теплоты, поглощённой калориметром, $Q_1 = c_1 m_1(\theta - t_1)$; количество теплоты, поглощённой водой, $Q_2 = c_2 m_2(\theta - t_1)$. Затем составляют уравнение теплового баланса:

$$Q + Q' = Q_1 + Q_2;$$
$$Q = Q_1 + Q_2 - Q';\ rm = Q_1 + Q_2 - Q'. \quad (79)$$

Отсюда

$$r = \frac{Q_1 + Q_2 - Q'}{m},$$

т.е.

$$r = \frac{\left(c_1 m_1 + c_2 m_2\right)\left(\theta - t_1\right) - cm\left(t_n - \theta\right)}{m}. \quad (80)$$

Задача 50. В латунный стакан массой 163 г, имеющий комнатную температуру (17°С), вливают 100 г воды при 50°С и 20° г воды при 10°С. Пренебрегая обменом теплоты с окружающими телами, определите окончательную температуру воды.

Задача 51. Для определения удельной теплоты плавления свинца был проделан опыт: 76 г расплавленного свинца при температуре 400°С вылили в медный калориметр массой 100 г, содержащий 200 г воды при 15°С. Окончательная температура установилась 21^0С. Определить удельную теплоту плавления свинца, принимая удельную теплоемкость жидкого свинца равной удельной теплоемкости твердого свинца.

Задача 52. Сколько потребуется каменного угля, чтобы расплавить 2 т серого чугуна, взятого при 20°С, если кпд плавильной печи 40%?

Задача 53. Сколько меди можно расплавить в плавильной печи с кпд 35%, сжигая 2,2 т угля, если начальная температура меди 13°С?

Задача 54. Автомобиль буксирует на снегу в течение 2 мин и развивает мощность, равную 20 л.с. Сколько снега при 0°С растает неизменном давлении). Приток теплоты расходуется на испарение жидкости. Эту теплоту называют теплотой парообразования. Чтобы обратить в пар один грамм жидкости, нагретой до температуры кипения, потребуется вполне определённое количество теплоты, причём для различных жидкостей это количество будет различным. При конденсации паров теплота выделяется в таком же количестве, в каком она была поглощена при испарении. Для характеристики этого свойства вводится величина, называемая удельной теплотой парообразования.

Удельной теплотой парообразования называется величина, численно равная тому количеству теплоты, которое необходимо для испарения единицы массы жидкого вещества при неизменной температуре.

Введём обозначения: r – удельная теплота парообразования, m – масса паров, Q – количество теплоты, необходимой для испарения вещества при температуре кипения, тогда

$$r = \frac{Q}{m}. \tag{77}$$

Из этой формулы получим

$$Q = rm, \text{ [дж/кг].} \tag{78}$$

Для определения удельной теплоты парообразования сначала находят путём взвешивания массу калориметра m_1 и берут из справочника числовое значение удельной теплоёмкости вещества $c1$, затем наливают холодной воды m_2 и измеряют температуру калориметра с водой $t_2 = t_1$ и пропускают пары кипящей жидкости из кипятильника в калориметр (через паросушитель) при температуре кипения. Эти пары конденсируются в калориметре, массу m которых находят после опыта путём повторного взвешивания калориметра. С помощью термометра измеряют окончательную температуру смеси θ и, найдя по справочнику удельную теплоёмкость исследуемой жидкости, вычисляют удельную теплоту парообразования r.

Для этого составляют уравнение теплового баланса. Определяют: количество теплоты, выделившейся при конденсации паров без изменения их температуры, $Q = rm$; количество теплоты, выделившейся при охлаждении жидкости, получившейся из пара

объем V_2 при температуре t_2 можно вычислить по следующей приближенной формуле:

$$V_2 = V_1\left[1 + \beta\left(t_2 - t_1\right)\right]. \tag{12}$$

Пример

Латунная цилиндрическая деталь при обработке на токарном станке нагревается до 100°C. Диаметр детали при температуре 20°C должен быть 5 см, допускаемые отклонения от заданного размера не должны превышать 10 микрон. Следует ли при измерениях во время обработки вносить поправки на тепловое расширение детали?

Решение

1. Определим абсолютное удлинение диаметра детали:

$l_2 - l_1 = \alpha l_1(t_2 - t_1)$.

2. Произведем вычисление:

$l_2 - l_1$ = 0,000019 *град* $^{-1}$ * 5см * 80 *град* = 0,0076 см = 0,076 мм = 76 мк.

Ответ. Абсолютное удлинение диаметра детали превышает допускаемое отклонение в 7,6 раз, поэтому следует внести поправку на тепловое расширение.

Задача 1. При 0ºC длины железного и цинкового стержней должны быть равны между собой, а при 100ºC должны разниться на 1 мм. Какие длины стержней при 0ºC удовлетворяют этому условию?

Задача 2. Внутренний диаметр полого медного цилиндра при 20°C равен 100 мм. В каком интервале температур отклонение от этой величины не превышают 50 мкм?

Задача 3. При помощи мерительного инструмента, сделанного из железа (например, штангенциркуля), предназначенного для работы при 20°C, измерили длину некоторого предмета при -20°C. Отсчет дал 19,97 см. Какова длина измеряемого тела?

Задача 4. Период колебания маятника часов может быть вычислен по формуле $T = 2\pi\sqrt{l/g}$, где l – приведенная длина маятника, g – ускорение силы тяжести. На сколько будут отставать часы за сутки, если температура поднимается на 20°С выше той, при которой часы выверены (маятник в часах железный)?

Задача 5. При 0°С железная цилиндрическая цистерна, высота которой 4 м, а диаметр 8 м, наполнена нефтью так, что не доходит до краев цистерны на 10 см. При какой температуре нефть заполнит всю цистерну?

Задача 6. Объем стеклянного шара при 0°С равен 100 см^3. При этой температуре в шар налили 96 см^3 ртути. При нагревании до 270°С ртуть заполнила весь шар. Определить коэффициент объемного расширения ртути, зная, что коэффициент линейного расширения стекла равен 0,000009 град$^{-1}$.

Задача 7. При определении плотности жидкостей употребляют пикнометры – стеклянные сосуды с узким горлышком, на котором ставятся отметки, соответствующие определенной емкости: 10 см^3, 50 см^3 и т.д. Пусть при 20°С емкость пикнометра равна 50 см^3. Какова она при 100°С?

Задача 8. Пикнометр наполнен денатурированным спиртом при 0°С и взвешен. Затем он погружен в сосуд с теплой водой. При помощи пропускной бумаги отобрано столько спирта, чтобы его уровень находился на прежней метке, после чего пикнометр снова взвешен. Каков коэффициент объемного расширения спирта при следующих данных: пикнометр пустой весит 32,7 г; со спиртом при 0°С – весит 74,5 г; со спиртом при 29°С – весит 73,2 г (расширением стекла пренебречь)?

Задача 9*. Найти связь между коэффициентами линейного и объёмного расширения твёрдого тела.

Произведя повторное взвешивание калориметра, находят массу вещества, влитого в калориметр (массу исследуемого вещества можно найти путем взвешивания его в твердом состоянии). Остальные недостающие величины определяют по справочнику.

Далее составляют уравнение теплового баланса и находят удельную теплоту плавления. Определяют:

1. Количество теплоты, выделенной при отвердевании:

$$Q = \lambda m. \qquad (72)$$

2. Количество теплоты, выделенной отвердевшим телом при остывании от температуры отвердевания до окончательной температуры:

$$Q' = cm\,(t_{отв} - \theta). \qquad (73)$$

3. Количество теплоты, которое пошло на нагревание калориметра, от начальной температуры до окончательной температуры:

$$Q_1 = c_1 m_1(\theta - t_1). \qquad (74)$$

4. Количество теплоты, которое пошло на нагревание воды от t_1 до θ:

$$Q_2 = c_2 m_2(\theta - t_1). \qquad (75)$$

Составляют уравнение теплового баланса:

$$Q+Q' = Q_1+Q_2; \quad Q = Q_1+Q_2 - Q';$$
$$\lambda m = Q_1+Q_2 - Q';$$

$$\lambda = \frac{Q_1 + Q_2 - Q'}{m} \text{ или} \qquad (76)$$

$$\lambda = \frac{(c_1 m_1 + c_2 m_2)(\theta - t_1) - cm(t_{отв} - \theta)}{m}.$$

Удельная теплота плавления или отвердевания равна теплоте, которая пошла на нагревание калориметра с водой, без теплоты, отданной веществом при изменении температуры, деленной на массу вещества.

5.2. Теплота парообразования. Удельная теплота парообразования

При кипячении воды в открытом сосуде при атмосферном давлении температура кипения жидкости остаётся неизменной (при

t'_{CT} = 1527°C, а на наружной t''_{CT} = 47°C. Теплопроводности: шамотного кирпича λ_1 = 1,28 Вт/(м·К), изоляционной прослойки λ_2 = 0,15 Вт/(м·К) и красного кирпича λ_3 = 0,8 Вт/(м·К). Как изменится тепловой поток в стенке, если изоляционную прослойку заменить красным кирпичом? Определить экономию в процентах от применения изоляционной прослойки. Кроме того, определить температуру между слоями.

5. РАВНОВЕСИЕ ФАЗ. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

5.1. Уравнение теплового баланса при плавлении и отвердевании

Плавлением называется процесс перехода вещества из твёрдого состояния в жидкое, при сообщении ему теплоты. Обратный процесс перехода из жидкого состояния в твёрдое, при отдаче им теплоты, называется *отвердеванием*. Температура плавления при нормальном давлении называется *точкой плавления. Удельной теплотой плавления* называется величина, численно равная тому количеству теплоты, которое необходимо для плавления единицы массы твёрдого вещества, взятого при температуре плавления.

Обозначив массу расплавленного вещества (исследуемого) через m, удельную теплоемкость вещества в твердом состоянии через c, начальную температуру этого же вещества через t, температуру плавления, равную температуре отвердевания, через $t_{пл} = t_{отв}$, удельную теплоту плавления через λ, массу калориметра через m_1, удельную теплоемкость калориметра через c_1, начальную температуру калориметра и воды через t_1 массу воды в калориметре через m_2, удельную теплоемкость воды через c_2, окончательную температуру смеси через θ, производят следующий опыт. Сначала определяют массу калориметра и массу воды в нем и измеряют их начальную температуру. Затем плавят некоторую массу вещества, например, олова и переливают в калориметр с водой. Исследуемое вещество при отвердевании и охлаждении отдает некоторое количество теплоты воде и калориметру и нагревает их.

После этого измеряют температуру смеси θ.

2. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Зависимость между объемом и давлением для одной и той же массы газа при постоянной температуре выражается законом Бойля–Мариотта и заключается в следующем: для данной массы газа при постоянной температуре объем газа изменяется обратно пропорционально давлению.

Если при давлении p_1 газ занимает объем V_1, а при давлении p_2 – объем V_2, тогда можно написать пропорцию

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{p_2}{p_1}. \qquad (13)$$

Многократно производя опыты, можно установить, что $p_1V_1 = p_2V_2 = \ldots = p_nV_n = \text{const}$ или $pV = \text{const}$, т.е. для данной массы газа при неизменной температуре произведение давления на объем есть величина постоянная.

Любой газ, находящийся при постоянном давлении, расширяется от нагревания. Измеряя температуру и объем расширившегося газа, можно вычислить коэффициент объемного расширения газа при постоянном давлении по формуле

$$\beta = \frac{V_t - V_0}{V_0 t}. \qquad (14)$$

В соответствии с законом Гей-Люссака коэффициент объемного расширения при постоянном давлении для всех газов одинаков и равен $\frac{1}{273}$ или 0,00366 град$^{-1}$. То есть для данной массы газа, находящегося при постоянном давлении, повышение температуры на 1°C вызывает расширение газа на $\frac{1}{273}$ часть начального объема, взятого при 0°C.

Объем газа при изобарическом процессе можно вычислить по формуле

$$V_t = V_0\left(1 + \frac{1}{273}t\right). \qquad (15)$$

Зная температуру нагретого газа t, начальное давление p_0 и давление нагретого газа p, при неизменном объеме, можно вычислить термический коэффициент давления. *Термическим коэффициентом давления газа называется величина, показывающая, на какую часть увеличивается давление газа от нагревания на 1°С при постоянном объеме относительно давления газа при 0°С.*

Обозначив термический коэффициент давления газа через γ, можно написать формулу согласно определению

$$\gamma = \frac{p_t - p_0}{p_0 t}. \qquad (16)$$

В соответствии с законом Шарля *термический коэффициент давления при постоянном объеме одинаков для всех газов и равен 1/273* град$^{-1}$. Из формулы (16) получим

$$p_t = p_0(1+\gamma t), \qquad (17)$$

т. е. давление газа, нагретого при постоянном объеме, равно начальному давлению, умноженному на бином термического давления. Двучлен, стоящий в скобках, называется *биномом термического давления.* Бином показывает, во сколько раз увеличилось давление газа при изохорическом нагревании от 0 до t°С.

Установить взаимную связь между объемом, давлением и температурой газа.

Обозначим объем газа при 0°С через V_0, а давление его через p_0. Оставим температуру газа неизменной (0°С), а давление изменим на p, тогда объем газа также изменится и станет равным V_1. Если t = const, то процесс в газе изотермический и по закону Бойля–Мариотта можем написать, что $p_0 V_0 = p V_1$.

При этом состоянии газа будем считать давление неизменным (p=const) и нагреем его до температуры t, тогда объем увеличится и станет равным V. Если p = const, то процесс изобарический и по закону Гей-Люссака можно записать, что $V = V_1(1+\beta t)$, отсюда

$$V_1 = \frac{V}{1+\beta t}. \qquad (18)$$

Подставим найденное выражение для V_1 в формулу закона Бойля–Мариотта и получим

протекающего со скоростью ω = 10 м/с, стенки прямой трубы диаметром d = 0,1 м и длиной l = 2 м. Средняя температура воздуха $t_ж$ = 120°С.

Задача 45*. Гладкая пластина шириной 1,5 м и длиной l = 2,0 м обтекается продольным потоком воздуха с температурой $T_ж$ = 293°К и со скоростью ω = 4,0 м/с. Вычислить коэффициент теплоотдачи α и тепловой поток Q, если температура поверхности плиты $T_{ст}$ = 353°К.

Задача 46*. Цилиндрическая труба с наружным диаметром d = 30 мм и длиной l = 5 м охлаждается поперечным потоком воды с температурой $T_ж$ = 283°К. Скорость воды ω = 2 м/с. Температура поверхности трубы $T_{ст}$ = 353^{0}К. Угол атаки 50°. Определить коэффициент теплоотдачи от поверхности трубы к охлаждающей воде и количество передаваемой теплоты.

Задача 47*. Определить тепловой поток, проходящий через кирпичную стенку, высотой 5 м, шириной 4 м и толщиной 250 мм. Температуры поверхностей стены t'_{cm} = 27°С и t''_{cm} = -23°С. Теплопроводность красного кирпича λ = 0,77 Вт/(м·К).

Задача 48*. Определить разность температур на наружной и внутренней поверхностях стальной стенки парового котла, работающего при манометрическом давлении 1,9 МПа. Толщина стенки котла составляет 20 мм; температура воды, поступающей в котел, 46°С. С 1 м^2 поверхности нагрева снимается 25 кг/ч сухого насыщенного пара. Теплопроводность стали λ = 50 Вт/(м·К); барометрическое давление 0,1 МПа. Стенку котла считаем плоской.

Задача 49*. Вычислить плотность теплового потока, проходящего через стенку неэкранированной топочной камеры парового котла толщиной 625 мм. Стенка состоит из трех слоев: одного шамотного кирпича толщиной 250 мм, изоляционной прослойки из мелкого шлака толщиной 125 мм и одного красного кирпича толщиной 250 мм. Температура на внутренней поверхности топочной камеры

Задача 37. В латунный калориметр массой 100 г, содержащий 200 г воды при температуре 20°С, опущено металлическое тело массой 100 г, нагретое до 100°С. Окончательная температура в калориметре установилась 24°С. Определить удельную теплоемкость вещества тела, зная, что удельная теплоемкость латуни равна 0,09 кал/г·град.

Задача 38. Определить коэффициент полезного действия примуса, зная, что при сжигании 200 г керосина можно вскипятить 11 л водя, взятой при 200°С.

Задача 39. На примусе, КПД которого 40%, нагревается до кипения 5 кг воды, налитой в медную кастрюлю массой 2 кг. Начальная температура воды 10°С. Определить расход керосина, полагая, что теплота, израсходованная на нагревание кастрюли, является полезной.

Задача 40. Средняя мощность автомобильного двигателя 40 л.с., а КПД 25%. На пробег 200 км израсходовано 50 кг бензина. Определить среднюю скорость движения, если удельная теплота сгорания бензина равна 11200 ккал/кг.

Задача 41. Какую механическую работу можно совершить за счет 7000 ккал теплоты?

Задача 42. Автомобиль движется со скоростью 54 км/ч. Запас бензина равен 20 кг. На сколько километров пути хватит бензина, если мощность двигателя 50 л.с., а КПД – 30% (q=11000 ккал/кг)?

Задача 43. Самолет летел со скоростью 720 км/ч и прошел 1800 км. Мощность моторов 1600 л.с., а КПД – 30%. Сколько бензина израсходовал самолет, если удельная теплота сгорания бензина 12000 ккал/кг?

Задача 44*. Определить коэффициент теплоотдачи α воздуха,

$$p_0V_0 = \frac{pV}{1+\beta t}. \qquad (19)$$

При другом конечном состоянии газа p_1, V_1, t_1 полученное равенство пришлось бы записать так: $p_0V_0 = \dfrac{p_1V_1}{1+\beta t_1}$. Подобных соотношений можно написать сколь угодно. Следовательно

$$\frac{pV}{1+\beta t} = \frac{p_1V_1}{1+\beta t_1} = \ldots = \frac{p_nV_n}{1+\beta t_n} \text{ или } \frac{pV}{1+\beta t} = const, \qquad (20)$$

т.е. для данной массы газа произведение давления газа на объем, деленное на бином объемного расширения, есть величина постоянная.

Преобразовывая бином объемного расширения газов, получим

$$1+\beta t = 1+\frac{1}{273}t = \frac{273+t}{273} = \frac{T}{273}. \qquad (21)$$

Подставляя значение бинома в уравнение состояния газа, мы получим следующее равенство:

$$\frac{pV}{T/273} = C \text{ или } \frac{273pV}{T} = C. \qquad (22)$$

Разделив обе части полученного равенства на 273, получим $\dfrac{pV}{T} = \dfrac{C}{273}$. Но C есть величина постоянная, поэтому и $\dfrac{C}{273}$ – также величина постоянная, которую мы обозначим через R, тогда равенство примет иной вид (объединённый газовый закон):

$$\frac{pV}{T} = R, \qquad (23)$$

т.е. *для данной массы газа произведение давления на объем, деленное на абсолютную температуру, есть величина постоянная.* Если начальное состояние газа характеризуется величинами p_1, V_1, T_1, а конечное состояние величинами p_2, V_2, T_2, тогда уравнение состояния газа запишется так:

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}. \qquad (24)$$

Пользуясь этой формулой, можно получить для законов Гей-Люссака и Шарля другие выражения.

При изобарическом процессе $p = \text{const}$, следовательно, $p_1=p_2=p$. Сокращая уравнение на p, получим закон Гей-Люссака в таком виде:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \text{ или } \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}, \qquad (25)$$

т. е. *объем газа при неизменном давлении прямо пропорционален абсолютной температуре.*

При изохорическом процессе $V = \text{const}$, следовательно, $V_1=V_2=V$. Сокращая уравнение (24) на V, получим закон Шарля в таком виде:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \text{ или } \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}, \qquad (26)$$

т. е. *при изохорическом процессе давление газа прямо пропорционально абсолютной температуре.*

Процессы, при которых передача теплоты между телами и окружающей средой настолько ничтожна, что ею можно пренебречь, называются *адиабатическими*. Поскольку при этом $\delta Q = 0$, то первое начало термодинамики для адиабатического процесса можно записать как

$$\delta A = -dU, \qquad (27)$$

где dU – изменение внутренней энергии.

Совместное применение этого выражения и уравнения Клапейрона–Менделеева позволяют получить уравнение, описывающее адиабатический процесс в идеальном газе. Для этого запишем (27) в виде

$$PdV = -\frac{M}{\mu}C_V dT. \qquad (28)$$

Определив полные дифференциалы от правой и левой частей уравнения Клапейрона–Менделеева, получим

$$t_3 = \frac{(c_1m_1 + c_2m_2)(\theta - t_1) + c_3m_3\theta}{c_3m_3}.$$

При сгорании топлива всегда выделяется гораздо больше теплоты, чем используется в полезных целях. В автомобильном двигателе лишь 21% количества теплоты идет на полезную работу, а остальные 79% расходуются бесполезно. Чтобы судить о качестве работы тепловой установки, находят коэффициент полезного действия, который выражается в процентах.

Задача 32. Коэффициенты теплопроводности латуни и цинка почти одинаковы. Удельные теплоемкости их тоже почти равны. Плотность латуни заметно больше плотности цинка. Какая из двух кружек со стенками одинаковой толщины быстрее прогреется при наливании кипятка: латунная или цинковая?

Задача 33. Сколько теплоты нужно затратить, чтобы вскипятить 2 кг воды, взятой при 100°С в алюминиевой кастрюле массой 0,3 кг?

Задача 34. Для нагревания кирпича массой 5 кг от 10 до 35°С было затрачено 80 ккал теплоты. Определить удельную теплоемкость кирпича.

Задача 35. Раскаленный уголь был вынут из печи и быстро погружен в калориметр массой 100 г и удельной теплоемкостью 0,09 кал/(г·град), содержащий 250 г воды при 150°С. Температура воды поднялась до 400°С. Масса угля была определена впоследствии (после измерения окончательной температуры смеси) и оказалась равной 50 г. Определить температуру печи. Удельную теплоемкость угля взять равной 0,25 кал/(г·град).

Задача 36. Стальную шестерню массой 500 г нагрели до высокой температуры, а затем погрузили в масло, взятое при 100°С. Определить начальную температуру шестерни, если масса масла 2 кг, а конечная температура смеси установилась 500°С (для стали c=0,11 кал/(г·град), для масла – 0,45 кал/(г·град). Нагреванием сосуда пренебречь.

выделившаяся при сгорании топлива (затраченная теплота), η – коэффициент полезного действия, тогда на основании определения напишем такую формулу:

$$\eta = \frac{Q_п}{Q_з}. \qquad (71)$$

Во многих случаях теплота используется весьма несовершенно: КПД малых паровых машин равен 5-10%, больших – 15%, локомотива 9-25%, паровых турбин – 18-20%, двигателей внутреннего сгорания 20-45%. Рациональное использование крупных электростанций с проведением теплофикации может значительно повысить к. п. д. до 70-75%.

Пример

Раскаленный уголь был вынут из печи и быстро погружен в калориметр массой 100 г и удельной теплоемкостью 0,09 кал/(г·град), содержащий 250 г воды при 15°С. Температура воды поднялась до 40°С. Масса угля была определена впоследствии (после измерения окончательной температуры смеси) и оказалась равной 50 г. Удельную теплоемкость угля можно взять равной 0,25 кал/(г·град). Определить температуру печи.

Решение

Обозначим искомую температуру через t_3 и будем придерживаться обозначений, введенных ниже.

1. Теплота, отданная углем при охлаждении:

$$Q_3 = c_3 m_3 (t_3 - \theta).$$

2. Теплота, полученная водой при нагревании:

$$Q_2 = c_2 m_2 (\theta - t_2).$$

3. Теплота, полученная калориметром при нагревании:

$$Q_1 = c_1 m_1 (\theta - t_1).$$

4. Составляем уравнение теплового баланса:

$$Q_3 = Q_2 + Q_1;$$

$$c_3 m_3 (t_3 - \theta) = c_1 m_1 (\theta - t_1) + c_2 m_2 (\theta - t_2).$$

5. Находим температуру печи, равную начальной температуре угля:

$$PdV + VdP = \frac{M}{\mu} RdT. \qquad (29)$$

Вычитая из этой формулы выражение (28), найдём

$$VdP = \frac{M}{\mu} RdT + \frac{M}{\mu} C_V dT. \qquad (30)$$

С учётом соотношения Майера имеем

$$VdP = \frac{M}{\mu} C_P dT. \qquad (31)$$

Умножив (28) на отношение теплоёмкостей и сложив полученное выражение с (31), найдём

$$\gamma PdV + VdP = 0, \qquad (32)$$

где γ – показатель адиабаты.

Разделив уравнение (32) на произведение PV, получим

$$\gamma \frac{dV}{V} + \frac{dP}{P} = 0 \text{ или } \gamma d(\ln V) + d(\ln P) = 0. \qquad (33)$$

Отсюда следует

$$d\ln(PV^{\gamma}) = 0. \qquad (34)$$

Или после интегрирования

$$PV^{\gamma} = \text{const}. \qquad (35)$$

Выражение (35) – *уравнение Пуассона* – является уравнением адиабатического процесса для идеального газа.

Пример

При 0°С газ занимает объем в 10 л. Какой объем займет газ при нагревании до 273°С, если давление будет постоянным?

Решение

Определим объем газа по формуле $V_t = V_0\left(1 + \frac{1}{273} t\right)$.

Производим вычисления:

$$V_t = 0{,}01v^3\left(1+\frac{1}{273}\text{град}^{-1}\cdot 273\text{град}\right)=0{,}02\text{м}^3=20\text{дм}^3$$

Пример

Внутри закрытого теплоизолированного цилиндрического сосуда расположен нетеплопроводный поршень, способный двигаться без трения. В начальный момент поршень находится в середине сосуда и делит его на равные части объемом V_0. В каждой половине сосуда находится идеальный газ с показателем адиабаты γ при давлении P_0. Какую работу надо совершить, чтобы уменьшить объем одной из частей сосуда в два раза?

Решение

В обеих частях цилиндрического сосуда будет происходить адиабатический процесс:

$$P_1V_1^{\gamma}=P_2V_2^{\gamma}=P_0V_0^{\gamma},$$

где V_1 и V_2 — объемы двух частей сосуда, связанные соотношением $V_1=2V_0-V_2$.

Пусть в два раза уменьшается объем V_1, т. е. V_1 изменяется от V_0 до $V_0/2$. Соответственно объем V_2 при этом увеличивается от V_0 до $3V_0/2$. Тогда элементарная работа, совершаемая над газом, будет определяться разностью давлений в двух частях сосуда:

$$\delta A'=-\delta A=-\left(P_2-P_1\right)dV_2.$$

(Здесь учтено, что $dV_1=-dV_2$.)

Подставив в это уравнение полученные соотношения для V_1, P_1 и P_2, после интегрирования получим

$$A'=-P_0V_0^{\gamma}\int_{V_0}^{3V_0/2}\left(\frac{1}{V_2^{\gamma}}-\frac{1}{\left(2V_0-V_2\right)^{\gamma-1}}\right)dV_2=\frac{P_0V_0^{\gamma}}{\gamma-1}\left(\frac{1}{V_2^{\gamma-1}}+\frac{1}{\left(2V_0-V_2\right)^{\gamma-1}}\right)\Bigg|_{V_0}^{3V_0/2}=$$

$$=\frac{P_0V_0^{\gamma}}{\gamma-1}\left(\frac{1}{\left(3V_0/2\right)^{\gamma-1}}+\frac{1}{\left(V_0/2\right)^{\gamma-1}}-\frac{2}{V_0^{\gamma-1}}\right)=\frac{P_0V_0}{\gamma-1}\left(\left(2/3\right)^{\gamma-1}+2^{\gamma-1}-2\right).$$

При γ = 1 полученное выражение равно нулю, в чем можно

масса m_1 удельная теплоемкость c_1 с холодной водой, температура которой t_2, масса m_2 и удельная теплоёмкость c_2. После смешения температура установилась θ°С. При этом:

1. Горячая вода охлаждается от температуры t_1 до θ и отдает теплоту:

$$Q_1=c_1m_1\,(t_1-\theta). \qquad (66)$$

2. Холодная вода нагревается от температуры t_2 до θ и получает теплоту:

$$Q_2=c_2m_2\,(\theta-t_2). \qquad (67)$$

3. Составим уравнение теплового баланса:

$$Q_1=Q_2;\; c_1m_1\,(t_1-\theta)=c_2m_2\,(\theta-t_2) \qquad (68)$$

(при составлении уравнения теплового баланса мы пренебрегли нагреванием калориметра).

Найдем из этого уравнения окончательную температуру смеси θ:

$$\theta=\frac{c_1m_1t_1+c_2m_2t_2}{c_1m_1+c_2m_2}. \qquad (69)$$

Аналогичным образом можно определить удельную теплоемкость вещества твердого тела. Введем обозначения: m_1 – масса калориметра; c_1 – удельная теплоемкость калориметра; t_1 – начальная температура калориметра; m_2 – масса воды, налитой в калориметр; c_2 – удельная теплоемкость воды; $t_2=t_1$ – начальная температура воды; m_3 – масса исследуемого вещества; c_3 – удельная теплоемкость вещества; t_3 – начальная температура вещества; θ – окончательная температура системы.

Удельная теплоемкость вещества равна количеству теплоты, поглощенной калориметром с водой, деленной на массу исследуемого вещества и температуру его охлаждения.

$$c_3=\frac{(c_1m_1+c_2m_2)(\theta-t_1)}{m_3(t_3-\theta)}. \qquad (70)$$

Коэффициентом полезного действия тепловой установки называется процентное отношение количества полезной теплоты, израсходованной по назначению, к полному количеству теплоты, выделившейся при сгорании топлива.

Введем обозначения: Q_n – полезная теплота, Q_3 – теплота,

4. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Теплообменом называется переход внутренней энергии от одного тела к другому вследствие неодинаковости температур этих тел.

Величина, численно равная количеству теплоты, необходимой для нагревания 1 г вещества на 1°С, называется удельной теплоемкостью вещества.

Обозначив удельную теплоемкость через c, массу через m, начальную температуру через t_1 конечную температуру через t_2, количество теплоты через Q, проведем следующие рассуждения.

Для нагревания 1 г вещества на 1°С потребуется c калорий; для m граммов в m раз больше, т. е. cm калорий, а той же массы m на t градусов – cmt калорий. На основании этого запишем, что

$$Q = cmt. \tag{62}$$

Количество теплоты, необходимое для нагревания тела массой m от t_1 до t_2 градусов, будет

$$Q = cm(t_2 - t_1). \tag{63}$$

Если тело охлаждается, то $t_t > t_2$, поэтому количество теплоты, выделяющейся при охлаждении тела, будет

$$Q = cm(t_1 - t_2). \tag{64}$$

Количество теплоты, поглощенной телом при нагревании или выделенной при охлаждении, равно произведению удельной теплоемкости вещества на массу тела и температуру нагревания или охлаждения.

Из формулы (62 67) найдем

$$c = \frac{Q}{mt}, \text{ [дж/(кг·град)].} \tag{65}$$

Полагая в этой формуле $Q = 1$ кал, $m = 1$ г, $t = 1$°С, получим $c = 1$ кал/(г·град); полагая Q = 1 ккал, $m = 1$ кг, $t = 1$°С, получим $c = 1$ ккал/(кг·град).Такую удельную теплоемкость имеет только химически чистая вода. Теплоемкость всех остальных веществ меньше единицы.

Уравнение теплового баланса гласит: *количество теплоты, отданной всеми остывающими телами, равно количеству теплоты, полученной всеми нагревающимися телами.* Рассмотрим такой пример: смешивают горячую воду, температура которой t_1,

убедиться, устремив γ к единице и раскрыв неопределенность; а при $\gamma > 1$ оно становится положительным, так как при увеличении γ второе слагаемое растет быстрее, чем убывает первое.

Задача 10. Газ при температуре 182°С занимает объем V. До какой температуры его следует охладить при постоянном давлении, чтобы объем стал равным 0,4V?

Задача 11. При некоторой температуре газ находится под давлением в 2 атм. На сколько градусов повысилась температура газа при неизменном объеме, если давление газа стало 2,5 атм?

Задача 12. Баллон емкостью 40 л содержит 3,96 кг углекислоты. При какой температуре возникает опасность взрыва, если баллон может выдержать давление не свыше 60 атм, а плотность углекислого газа при нормальных условиях равна 0,00198 кг/дм^3?

Задача 13. Определить массу воздуха в комнате размерами 5×3×4 м при температуре 20°С и давлении 0,99 атм, если плотность воздуха при нормальных условиях равна 0,00129 кг/дм^3.

Задача 14. Адиабатически изолированный сосуд разделен перегородкой на две равные части, каждая объемом V. В левой части находится двухатомный идеальный газ при давлении и температуре T. Торцевая стенка правой части сосуда является поршнем. Перегородку вынули, а затем газ медленно сжали поршнем так, что он снова стал занимать левую половину сосуда. Найти давления P_1, P_2 и температуры T_1, T_2 газа после изъятия перегородки и в конце процесса.

Задача 15. Жесткий теплоизолированный сосуд объемом V разделен на две части перегородкой. В начальный момент времени с одной стороны перегородки в объеме V_1 находится ν_1 моль идеального газа теплоемкостью C_{V1} при температуре T_1, а с другой стороны перегородки в объеме V_2 $\left(V = V_1 + V_2\right)$ – ν_2 моль другого идеального газа теплоемкостью C_{V2} при температуре T_2. Перегородку медленно удаляют, что приводит к смешиванию газов и выравниванию их температуры. Определить изменение энтропии в этом процессе.

Задача 16. Термодинамическая система, состоящая из двух находящихся в тепловом контакте тел, помещена в адиабатическую оболочку. Теплоемкости тел одинаковы и равны C. Температура первого тела в некоторый момент времени равна T_1, второго – T_2, причем $T_2 > T_1$. Найти уравнение, описывающее изменение энтропии системы с течением времени при ее стремлении к состоянию термодинамического равновесия. Считать, что передача теплоты от одного тела к другому описывается формулой $\delta Q = k\left(T_2 - T_1\right)dt$, где k – коэффициент теплопередачи.

Задача 17. Определить выражение для внутренней энергии энтропии фотонного газа, уравнение состояния которого имеет вид $P(T) = \alpha T^4$.

Задача 18. Показать, что внутренняя энергия вещества с уравнением состояния в форме p= f (V)T не зависит от объема. Здесь p – давление, T – абсолютная температура, f (V) – функция только от V.

Задача 19. Показать, что если $\left(\partial U/\partial V\right)_T = 0$, то и $\left(\partial U/\partial p\right)_T = 0$. Здесь U – внутренняя энергия, T – абсолютная температура, V – объем и p – давление.

Задача 20. В случае адиабатического квазистатического сжатия выразить $\chi_s = (\partial T/\partial p)_s$ (адиабатический температурный коэффициент) через коэффициент теплового расширения при постоянном давлении α и теплоемкость при постоянном давлении C_p. В случае квазистатического расширения системы при

Задача 27. Рассчитать КПД термодинамического цикла Карно для тепловой машины, у которой рабочим телом является один моль реального газа, описываемого уравнением Ван-дер-Ваальса. Использовать уравнение состояния $P(V,T) = \dfrac{RT}{V-b} - \dfrac{a}{V^2}$ и выражения для внутренней энергии $U(V,T) = C_v T - \dfrac{a}{V}$ газа Ван-дер-Ваальса.

Задача 28. Рассчитать КПД термодинамического цикла Карно для тепловой машины, у которой рабочим телом является фотонный газ. Использовать уравнение состояния $P(T) = \alpha T^4$ и выражение для внутренней энергии $U(V,T) = 3\alpha T^4 V$ фотонного газа. Термодинамический цикл Карно для фотонного газа приведен на рис. 7.

Задача 29. Пусть цикл Карно действует между тепловыми резервуарами с температурами T_1 и $T_2 = T_1 - dT,$ а рабочим веществом служит газ. Используя этот цикл, доказать следующее уравнение $\left(\dfrac{\partial p}{\partial T}\right)_V = \dfrac{1}{T}\left[\left(\dfrac{\partial U}{\partial V}\right)_T + p\right]$, где p – давление, V – объем и U – внутренняя энергия.

Задача 30*. Рассмотреть применение уравнения (61) для определения соотношения между уравнением состояния $P = P(V, T)$ и выражением для внутренней энергии $U = U(V, T)$ термодинамической системы.

Задача 31. Привести пример процесса, при котором вся теплота, заимствованная из теплового резервуара, превращается в работу.

4 – 1 получаем следующие соотношения:

$$\frac{T_3}{T_2}=\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}=\varepsilon^{1-\gamma};\ \frac{T_4}{T_1}=\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}=\varepsilon^{1-\gamma}.$$

Выразив из этих формул температуры T_3 и T_4 и подставив их в выражение для КПД, найдем

$$\eta=\frac{\left(T_2-T_1\right)-\left(\varepsilon^{1-\gamma}T_2-\varepsilon^{1-\gamma}T_1\right)}{T_2-T_1}=1-\varepsilon^{1-\gamma}.$$

Таким образом, КПД двигателя внутреннего сгорания зависит от степени сжатия ε, которая является одной из основных характеристик двигателя.

Задача 26. Рассчитать КПД прямоточного воздушно-реактивного двигателя, термодинамический цикл которого состоит из следующих процессов (рис. 6): 1 – 2 – изохорический подвод теплоты при сгорании топлива в камере сгорания; 2 – 3 – адиабатическое расширение продуктов сгорания в сопле; 3 – 4 – изобарическое охлаждение продуктов сгорания в атмосфере; 4 – 1 – адиабатическое сжатие атмосферного воздуха. Теплота подводится при постоянном давлении P_1, а отводится при давлении окружающей атмосферы $P_2 = P_1/\beta$. Рабочее тело рассматривать как идеальный газ с показателем адиабаты, равным γ.

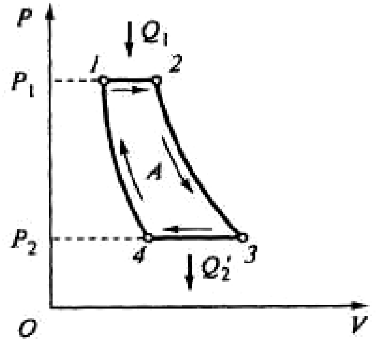


Рис. 6. Термодинамический цикл прямоточного воздушно-реактивного двигателя

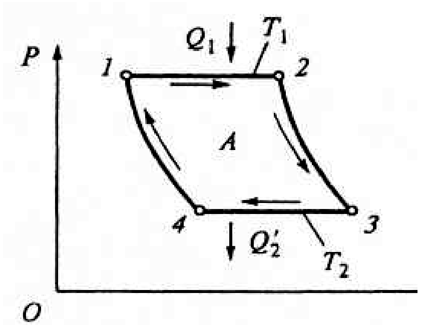


Рис. 7. Термодинамический цикл Карно в случае использования фотонного газа

постоянном давлении выразить через χ_s возрастание энтропии.

Задача 21. Показать, что в случае газа, давление которого при постоянном объеме изменяется пропорционально абсолютной температуре, энтропия S возрастает с увеличением объема V.

Задача 22. Показать, что в соответствии с третьим законом термодинамики коэффициент теплового расширения $(1/V)(\partial V/\partial T)_p$ и коэффициент $(\partial p/\partial T)_V$ стремятся к нулю при $T\to 0$.

Задача 23. Принимая, что процесс распространения звука в воздухе изотермический, Ньютон получил следующую формулу для скорости звука:

$$c=\sqrt{\frac{P}{\rho}},$$

где P – давление, ρ – плотность воздуха. Эта формула давала слишком малые значения для c. Лаплас принял, что процесс распространения звука в воздухе адиабатический, и получил согласующуюся с опытом формулу $c=\sqrt{\gamma\frac{P}{\rho}}$, где $\gamma=\frac{C_p}{C_V}$. Объяснить качественно, почему скорость звука по формуле Лапласа больше, чем по формуле Ньютона. В местах сжатия воздух нагревается, вследствие чего его упругость по сравнению с упругостью при таком же изотермическом сжатии увеличивается. В местах же разрежения воздух охлаждается, а его упругость соответственно уменьшается. Казалось бы, что влияние нагревания в местах сжатия должно компенсироваться влиянием охлаждения в местах разрежения, и скорости звука при изотермическом и адиабатическом процессах должны быть одинаковыми.

Задача 24. Одним из самых точных экспериментальных способов определения отношения $\gamma = \dfrac{C_p}{C_V}$ является измерение скорости звука в изучаемом газе. Найти связь между скоростью звука, отношением теплоёмкостей γ и изотермическим модулем упругости. Чему равна скорость звука в идеальном газе?

Задача 25. Найти увеличение скорости звука в воздухе при нагревании последнего от 0 до 1 °С.

3. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ

3.1. Тепловые машины

Тепловые машины (ТМ) или тепловые двигатели, предназначенные для получения полезной работы за счет теплоты, выделяемой вследствие химических реакций (сгорание топлива), ядерных превращений или по другим причинам (например, вследствие нагрева солнечными лучами). На рис.1,*а* приведена условная схема тепловой машины, а на рис. 1,*б* – её термодинамический цикл.

Для функционирования ТМ обязательно необходимы следующие составляющие: *нагреватель, холодильник и рабочие тело*. При этом, если необходимость в наличии нагревателя и рабочего тела обычно не вызывает сомнений, холодильник как составная часть ТМ в её конструкции зачастую отсутствует. В качестве холодильника выступает окружающая среда.

Принцип действия ТМ заключается в следующем. Нагреватель передает рабочему телу теплоту $Q1$, вызывая повышения его температуры. Рабочее тело совершает работу A над каким-либо механическим устройством, например приводит во вращение турбину, и далее отдает холодильнику теплоту $Q'2$, возвращается в исходное состояние. Величина $Q2 = -Q'2$ представляет собой количество теплоты, передаваемое холодильником рабочему телу, и имеет отрицательное значение.

Наличие холодильника и передача ему части полученной от нагревателя теплоты, являются обязательным, так как иначе работа тепловой машины невозможна (для получения механической

сгорании топлива в цилиндре двигателя; 2→3 – адиабатическое расширение рабочего тела; 3→4 – изохорический отвод теплоты при выбросе отработанного газа в атмосферу; 4→1 – адиабатическое сжатие рабочего тела. Теплота подводится при постоянном объеме V_1, а отводится при $V_2 = \varepsilon V_1$, где ε – степень сжатия. Рабочее тело рассматривать как идеальный газ с показателем адиабаты, равным γ.

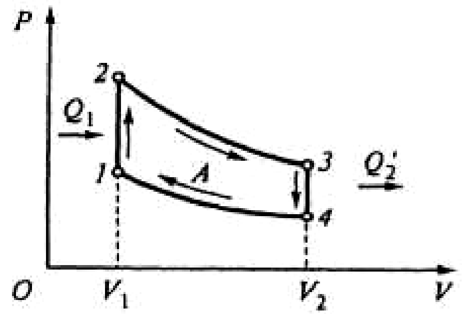


Рис. 5. Термодинамический цикл двигателя внутреннего сгорания

Решение.

В соответствии с выражениями (43) и подведенная, и отведенная в изохорических процессах 1 – 2 и 3 – 4 теплота может быть определена так:

$$Q_1 = \frac{M}{\mu} C_v \left(T_2 - T_1\right);$$

$$Q_2' = \frac{M}{\mu} C_v \left(T_3 - T_4\right).$$

Тогда на основании выражения (44) имеем

$$\eta = \frac{\frac{M}{\mu} C_v \left(T_2 - T_1\right) - \frac{M}{\mu} C_v \left(T_3 - T_4\right)}{\frac{M}{\mu} C_v \left(T_2 - T_1\right)} = \frac{\left(T_2 - T_1\right) - \left(T_3 - T_4\right)}{T_2 - T_1}.$$

Согласно формуле (39) для адиабатических процессов 2 – 3 и необратимый процесс. Это утверждение является одной из формулировок второго начала термодинамики.

Изолированная термодинамическая система стремится к максимальному значению энтропии, при котором наступает состояние термодинамического равновесия. Необходимо отметить, что если система не является изолированной, то в ней возможно уменьшение энтропии. Примером может служить обычный холодильник, внутри которого возможно уменьшение энтропии. Но для таких открытых систем локально понижение энтропии всегда компенсируется возрастанием энтропии в окружающей среде, которое превосходит это уменьшение.

3.5. Основное неравенство и основное уравнение термодинамики

Согласно второму началу термодинамики, элементарное количество теплоты δQ связано с изменением энтропии системы dS следующим неравенством:

$$TdS \geq \delta Q\,. \tag{58}$$

Рассматривая его совместно с первым началом термодинамики:

$$\delta Q = dU + PdV\,. \tag{59}$$

Получаем основное неравенство термодинамики в виде

$$TdS \geq dU + PdV\,. \tag{60}$$

Здесь знак равенства соответствует равновесным термодинамическим процессам, а знак «больше» – неравновесным.

Для анализа равновесных процессов выражение (61) можно записать в виде уравнения

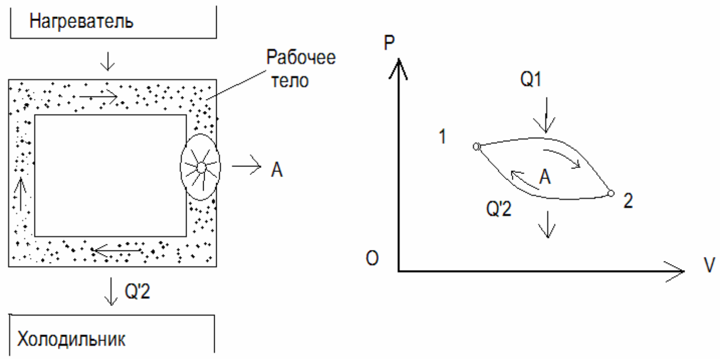
$$TdS = dU + PdV\,, \tag{61}$$

которое носит название основного уравнения термодинамики равновесных (обратимых) процессов. С его помощью можно рассчитывать любые равновесные термодинамические процессы.

Пример

Рассчитать КПД двигателя внутреннего сгорания, термодинамический цикл которого состоит из следующих процессов (рис. 5): 1→2 – изохорический подвод теплоты при

работы необходимо наличие потока, в данном случае потока теплоты. Если же холодильник будет отсутствовать, то рабочее тело неизбежно придет в тепловое равновесие с нагревателем и поток теплоты прекратится).



а б

Рис. 1. Схема тепловой машины (*а*) и её термодинамич. цикл (*б)*

В соответствии с первым началом термодинамики, при осуществлении кругового процесса в результате возвращения рабочего тела в исходное состояние его внутренняя энергия за цикл не изменится. Поэтому совершенная рабочим телом механическая работа равна разности подведенной и отведенной теплоты :

$$A = Q_1 - Q_2\,. \tag{36}$$

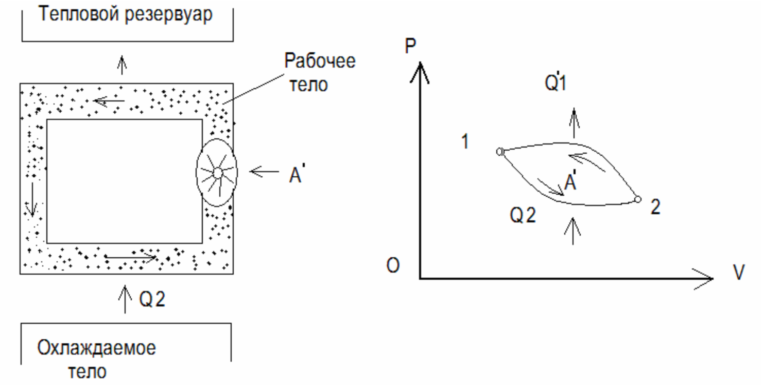
Тепловой коэффициент полезного действия (КПД) цикла любой ТМ можно рассчитать как отношение полезной работы A к количеству теплоты $Q1$, переданной от нагревателя:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}\,. \tag{37}$$

Из выражения (37) следует, что КПД любой ТМ всегда меньше единицы, так как часть полученной от нагревателя теплоты должна передаваться холодильнику.

Термодинамический цикл, осуществляемый в обратном направлении, может быть использован для работы холодильной машины (рис. 2). В отличие от тепловых двигателей такие машины не предназначены для получения механической работы из теплоты; они позволяют осуществлять охлаждение различных тел за счет совершения работы.

В холодильной машине вследствие совершения внешними телами работы A' над рабочим телом происходит отвод теплоты $Q2$ от охлаждаемого тела и передача теплоты $Q1$ тепловому резервуару, в качестве которого обычно выступает окружающая среда.



а б

Рис. 2. Схема холодильной машины (*а*) и ее термодин-й цикл (*б*)

КПД (холодильный коэффициент) холодильной машины можно определить как отношение отведенного от охлаждаемого тела количество теплоты $Q2$ к затраченной для этого механической работе A':

$$\eta_{x.m} = \frac{Q_2}{A'} = \frac{Q_2}{Q'_1 - Q_2}. \tag{38}$$

Поскольку в зависимости от конкретной конструкции холодильной машины количество отводимой от охлаждаемого тела теплоты $Q2$ может как превышать затраченную работу A', так и быть меньше ее. КПД холодильной машины в отличие от КПД тепловой машины может быть как больше, так и меньше единицы.

кругового термодинамического процесса, изображенного на рис. 4.

Пусть процесс 1→2 будет необратимым, а 2→1 – обратимым. Тогда неравенство Клаузиуса для этого случая примет вид

$$\int\limits_{1\to 2} \frac{\delta Q}{T} + \int\limits_{2\to 1} \frac{\delta Q}{T} < 0. \tag{51}$$

Так как процесс 2→1 является обратимым, для него можно воспользоваться соотношением (49), согласно которому

$$\int\limits_{2\to 1} \frac{\delta Q}{T} = S_1 - S_2. \tag{52}$$

Подставив это выражение в неравенство (51), получаем

$$S_2 - S_1 > \int\limits_{1\to 2} \frac{\delta Q}{T}. \tag{53}$$

Сопоставив выражения (49) и (53), приходим к неравенству

$$S_2 - S_1 \geq \int\limits_{1\to 2} \frac{\delta Q}{T}, \tag{54}$$

в котором знак равенства имеет место в случае, если процесс обратимый, а знак «больше» – если процесс необратимый. Неравенство (54) можно также записать в дифференциальной форме

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T}. \tag{55}$$

В адиабатически изолированной термодинамической системе, для которой $Q = 0$, выражение (55) имеет вид

$$dS \geq 0, \tag{56}$$

или в интегральной форме

$$S_2 \geq S_1. \tag{57}$$

Полученные неравенства представляют собой математическую запись закона возрастания энтропии, который можно сформулировать так: в адиабатически изолированной термодинамической системе энтропия не может убывать – она или сохраняется, если в системе происходят только обратимые процессы, или возрастает, если в системе протекает хотя бы один

$$S_2 - S_1 = \int\limits_{1\to 2} \frac{\delta Q}{T}\,. \qquad (49)$$

Величина S является функцией только равновесного состояния термодинамической системы. Она не зависит от конкретного вида термодинамического процесса, приведшего систему в указанное состояние. Эта функция была названа *термодинамической энтропией*. Выражение (48) и (49) представляют собой математическую запись определения термодинамической энтропии.

Термодинамическую энтропию, как и потенциальную энергию, определяют с точностью до произвольной постоянной. Это связано с тем, что формула (49) не позволяет определить абсолютное значение термодинамической энтропии, а дает только разность энтропии для двух равновесных состояний как суммарное приведенное количество теплоты в обратимом термодинамическом процессе, переводящем систему из одного состояния в другое.

Термодинамическая энтропия применима для описания равновесного состояния термодинамической системы. Для определения энтропии S системы, находящейся в квазиравновесном состоянии, при котором можно считать, что ее отдельные части (подсистемы) находятся в состоянии равновесия, можно воспользоваться свойством аддитивности энтропии:

$$S = \sum_{i=1}^{N} S_i\,. \qquad (50)$$

Свойство аддитивности энтропии позволяет описывать состояние неравновесной макроскопической системы путем ее разбиения на достаточно большое число подсистем, которые можно считать в состоянии локального равновесия. Такой подход дает возможность распространить результаты равновесной термодинамики на системы, находящиеся не в равновесном состоянии, но которые можно представить как состоящие из некоторого числа равновесных подсистем.

3.4. Закон возрастная энтропии

Применим неравенство Клаузиуса для описания необратимого

3.2. Термодинамический цикл Карно

Обратимый цикл Карно состоит из двух изотерм, описывающих процесс теплопередачи от нагревателя к рабочему телу и от рабочего тела к холодильнику, и двух адиабат, описывающих расширение и сжатие рабочего тела в тепловой машине (рис. 3).

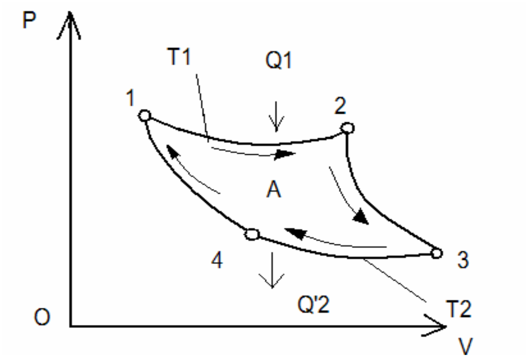


Рис. 3. Термодинамический цикл Карно

Температура нагревателя равна $T1$, а температура холодильника – $T2$. При этом температуры $T1$ и $T2$ постоянны, что должно обеспечиваться бесконечно большой теплоемкостью используемых тепловых резервуаров.

При первом изотермическом процессе 1→2 происходит передача рабочему телу теплоты $Q1$, при чем передается она бесконечно медленно при практически нулевой разности температур нагревателя и рабочего тела. Далее рабочее тело подвергается адиабатическому расширению без теплообмена с окружающей средой (процесс 2→3). При последующем изотермическом процессе 3→4 холодильник получает от рабочего тела теплоту $Q'2$. Процесс 4→1 представляет собой адиабатическое сжатие, переводящее рабочее тело в первоначальное состояние.

Рассчитаем КПД цикла Карно в случае, если в качестве рабочего тела используются идеальный газ, масса которого M. Уравнение адиабаты в переменных T, V имеет вид

$$TV^{\gamma-1} = const\,. \qquad (39)$$

Применительно к процессам 2→3 и 4→1, получаем:

$$T_1V_2^{\gamma-1} = T_2V_3^{\gamma-1}, \qquad (40)$$

$$T_1V_1^{\gamma-1} = T_2V_4^{\gamma-1}. \qquad (41)$$

После деления (40) на (41) имеем:

$$V_2 / V_1 = V_3 / V_4. \qquad (42)$$

Учитывая, что процессы 1→2 и 3→4 являются изотермическими, а следовательно, происходят без изменений внутренней энергии газа, для получаемой $Q1$ и отдаваемой $Q'2$ теплоты на основании первого начала термодинамики можно записать:

$$Q_1 = A_{12} = \frac{M}{\mu} RT_1 \ln\frac{V_2}{V_1}; \qquad Q'_2 = A'_{34} = \frac{M}{\mu} RT_2 \ln\frac{V_3}{V_4}. \qquad (43)$$

Подставим эти выражения в формулу (37), получим:

$$\eta = \frac{\frac{M}{\mu} RT_1 \ln\frac{V_2}{V_1} - \frac{M}{\mu} RT_2 \ln\frac{V_3}{V_4}}{\frac{M}{\mu} RT_1 \ln\frac{V_2}{V_1}}. \qquad (44)$$

С учетом соотношения (42) это выражения запишем в виде

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \qquad (45)$$

Выражение (42) позволяет определить КПД цикла Карно обратимой тепловой машины, в которой в качестве рабочего тела используют идеальный газ. Из приведенных формул следует, что *КПД такой тепловой машины всегда меньше единицы и полностью определяется температурами нагревателя и холодильника*.

3.3. Термодинамическая энтропия

Понятие термодинамической энтропии, введенное Клаузиусом, имеет ключевое значение для понимания основных положений термодинамики.

Рассмотрим обратимый круговой термодинамический процесс, представленный на рис. 4.

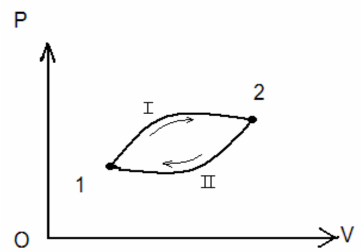


Рис. 4. Обратимый круговой термодинамический процесс

Для этого процесса равенство Клаузиуса имеет вид

$$\int_{1\to2} \frac{\delta Q}{T} + \int_{2\to1} \frac{\delta Q}{T} = 0, \qquad (46)$$

где первый интеграл берется по траектории I, а второй – по траектории II.

Изменение направления протекания процесса 2→1 на противоположное 1→2, что возможно вследствие обратимости этого процесса, приводит к замене знака перед вторым интегралом в формуле (46). После замены и переноса второго интеграла в правую часть выражения (46) имеем

$$\int_{1\to2} \frac{\delta Q}{T} = \int_{1\to2} \frac{\delta Q}{T}. \qquad (47)$$

Из полученного выражения следует, что для обратимых процессов интеграл $\int_{1\to2} \frac{\delta Q}{T}$ не зависит от формы траектории, по которой происходит процесс, а определяется только начальными и конечными равновесными состояниями термодинамической системы.

Таким образом, элементарное приведенное количество теплоты δQ должно представлять собой полный дифференциал некоторой функции S, зависящей только от состояния термодинамической системы:

$$dS = \frac{\delta Q}{T}, \qquad (48)$$